第 37 卷第 13 期
2017 年 7 月
生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.13
Jul.,2017

DOI: 10.5846/stxb201602140278
张智光.面向生态文明的超循环经济:理论、模型与实例.生态学报,2017,37(13):4549-4561.
Zhang Z G.Hypercycle economy oriented to an ecological civilization: theory, model, and instance.Acta Ecologica Sinica,2017,37(13):4549-4561.

面向生态文明的超循环经济:理论、模型与实例

张智光 *
南京林业大学经济管理学院,南京　210037

摘要:在全球气候变化背景下,研究适应生态文明要求的新的经济运行模式——超循环经济的基本原理、结构模型、运行机理和实际应用。首先,运用系统结构分析方法梳理不同时期经济运行模式的演进过程:由"从摇篮到产品"的粗放经济,到"从摇篮到坟墓"的末端治理经济,再到"从摇篮到摇篮"的循环经济。延续这一绿色发展趋势,根据文明演化的共生理论和艾根创立的超循环理论,提出超循环经济的理论构想,并描绘"从孕育到孕育"的超循环经济的概念结构。其次,将超循环经济思想应用于林纸拓展系统(EFPS)。在分析中国造纸工业的发展现状和瓶颈及其与林业和生态环境相互关系的基础上,按照资源链、生态链和价值链(简称"三链",或 3C)逐层拓展的逻辑顺序,研究 EFPS 超循环经济的系列结构模型。具体来说,依次建立起各层次的超循环结构模型——制浆造纸系统的资源链核心层模型、供应链系统的资源链拓展层模型、生态环境系统的生态链拓展层模型,以及社会经济系统的价值链拓展层模型。然后将各层次的结构模型综合起来,形成 EFPS 超循环经济的多重拓展-嵌套整体模型。该模型既能展示 EFPS 超循环经济系统的全貌,又包含其各层次的系统结构。因此既能为各级政府在制定国家和地区的循环经济总体发展规划时提供参考,又能为制造企业、营林组织、供应链、行业协会等各类经济主体的绿色经营决策提供支撑。最后,在上述实证研究的基础上进行理论提升。一方面提出超循环经济的 5R 原则:减量化、再循环、再利用、再分配和再培育。另一方面基于 5R 原则和 3C 循环链,构建 5R-3C 理论模型,并研究其 5R-3C 共生运行机理。研究表明,在超循环经济模式下,产业与生态系统可以实现互利共生的良性循环。以上研究成果的主要创新之处在于:在原理上,揭示了面向生态文明的超循环经济的概念结构、本质属性和 5R 原则;在机理上,创立了超循环经济的 5R-3C 模型及其共生运行机理;在实施上,以林纸拓展系统为例,为超循环经济理论的"落地生根"和推广应用构建了具体的多重拓展-嵌套模型。

关键词:循环经济;超循环经济;超循环理论;共生理论;林业;造纸工业;生态文明

Hypercycle economy oriented to an ecological civilization: theory, model, and instance

ZHANG Zhiguang *
College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, *China*

Abstract: A new economic pattern "hypercycle economy" oriented to the requirements of an ecological civilization is researched under the background of global climate change. This study includes its basic principles, structural models, operational mechanism, and practical applications. Firstly, the evolving process of economic patterns in different periods is summarized as follows: "cradle-to-product" in an extensive economy, "cradle-to-grave" in an end-treatment economy, and "cradle-to-cradle" in a circular economy, through the analysis of system structures. Following the trend of "green" evolution, a new theoretical hypothesis of hypercycle economy is conceived, and its conceptual structure of "breeding-to-breeding" is described, according to the symbiosis theory of human civilization's evolution and the hypercycle theory put forth by Manfred Eigen in the 1970s. Next, the principle of hypercycle economy is applied to an expanded forest-paper

基金项目:国家自然科学基金项目(71673136,70873059);国家科技支撑计划课题(2006BAD32B08); 国家林业局软科学研究项目(2013-R07);江苏省软科学研究项目(BR2015066)

收稿日期:2016-02-14;　　**网络出版日期**:2017-02-23

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zzg@ njfu.com.cn

system (EFPS). By analyzing the development and the bottlenecks of the Chinese paper industry, and its relationship with forestry and the natural environment, a series of structure models for EFPS hypercycle economy are studied by means of layer-by-layer expansion in the logical order of resources chain, eco-chain, and value chain (three chains, or 3C). Specifically, the hypercycle structure models for different layers are established successively as follows: the core layer of resources chain in pulp and paper system, expanded layer of resources chain in the supply chain system, expanded layer of eco-chain in the natural environment system, and expanded layer of value chain in the socio-economy system. Then, a multi-layer expansion-nestification overall model of EFPS hypercycle economy is constituted by means of synthesizing the structure models of various layers. This model not only reveals the complete picture of the EFPS hypercycle economy system, but also retains the system structures of its various layers. Thus, this not only provides references for governments at different levels to make national or regional development plans about circular economy, but also provides support to various economic entities, such as manufacturing enterprises, forestry organizations, supply chains, and business associations to make green business decisions. Finally, the above-mentioned empirical research is promoted in theory. On the one hand, the 5R principle of hypercycle economy is proposed as follows: reduction, recycle, reuse, redistribution, and recultivation. On the other hand, a 5R-3C theoretical model is created according to the 5R principle and the three chains, and then its symbiotic operational mechanism is researched. The study shows that the industrial system and ecosystem can achieve a positive circle of mutualism in hypercycle economy. The main innovations of the above research are as follows. In principle, the conceptual structure, essential attributes, and 5R principles of hypercycle economy oriented to an ecological civilization are revealed. In mechanism, 5R-3C model and its symbiotic operational mechanism for hypercycle economy are founded. And in realization, the concrete multi-layer expansion-nestification model of EFPS hypercycle economy is established, which contributes a practical example for the application of hypercycle economy theory to a wider field.

Key Words: circular economy; hypercycle economy; hypercycle theory; symbiosis theory; forestry; paper industry; ecological civilization

如果说狭义循环经济正在逐步脱离青色文明阶段[1],并且叩响了生态文明的大门,而广义循环经济刚刚迈进生态文明(绿色文明)的门槛,以实现浅绿文明为发展目标,那么超循环经济则是入门后的一种顺应生态文明要求的发展模式,走上了一条深绿文明的康庄大道。但是目前关于超循环经济的研究与生态文明的要求还有较大的差距,还不是真正意义上的超循环经济,本质上还属于广义循环经济。为此,本文拟研究面向生态文明的超循环经济理论和模型,并以林纸拓展系统(expanded forest-paper system,EFPS)为例,通过实证表明超循环经济理论具有深厚的现实根基。

1 文献回顾与分析

循环经济(circular economy,CE)学说首先由美国经济学家 K·波尔丁(Kenneth Boulding)于 1966 年提出。他认为在人类与自然资源构成的大系统内,应当将传统的资源开采、企业生产、产品消费、废弃物排放的资源依赖和消耗型单向经济增长方式,转变为资源节约和循环利用的生态型经济发展方式,以缓解自然资源枯竭和生态环境破坏的问题[2]。此后,各国学者对循环经济问题进行了广泛而深入的研究。其中,从 2006 年至今,中国学者每年发表的相关学术论文数量最多,对循环经济的研究做出了重要贡献[3]。通过对现有文献的梳理,可以归纳出循环经济的核心内涵。从拓扑结构看,循环经济是一种闭环经济(closed-loop economy),而传统的经济模式则属于开环经济(open-loop economy)或线性经济(linear economy)[4]。从核心思想看,循环经济遵循减量化(reduction)、再循环(recycle)、再利用(reuse)的 3R 原则[5]。从系统范围,循环经济系统可分为 3 个层次:小循环(单个企业与自然系统)、中循环(多个企业与自然系统)、大循环(社会经济与自然系统)[6]。前两者为狭义循环经济,后者为广义循环经济[7]。

一些学者认为上述循环经济理论仍存在局限性，并借鉴德国科学家艾根（Manfred Eigen）的超循环理论（hypercycle theory）提出了超循环经济设想。最初的超循环经济结构包含两个循环层面：基础层循环（物质、能量和信息循环）和创新层循环（系统开放及发展效率的创新）。其拓扑结构为：循环（资源→产品→再生资源）→创新→新循环[8]。而后，为了使超循环经济结构与超循环理论中的反应循环、催化循环和超循环结构更加吻合，研究者又将两层结构进一步分解成 3 层循环结构：内循环（反应循环，单个企业资源循环）、中循环（催化循环，由多个企业内循环构成的大资源循环）、超循环（由多个中循环构成的社会经济和自然系统的物质、信息和资金循环）。同时，将循环经济的 3R 原则拓展成减量化、再循环、再利用和再创新（reinnovation）4R 原则[9]。

对超循环经济的探索为我们进一步深化循环经济理论与实践提供了新的思路：循环经济不仅有工业生态学等发展分支[3]，还可以向更加深广的生态经济自组织理论方面拓展。但仔细比较后不难发现，现行超循环经济的构想与循环经济，尤其是广义循环经济没有本质的差异，还不是真正意义上的超循环经济。具体来说，主要有以下几方面的问题。（1）现行超循环经济的 3 个层次（内循环、中循环、超循环）与循环经济的 3 个层次（小循环、中循环、大循环）都将研究范围扩展到了社会经济和自然系统，没有实质性的区别，只是前者运用超循环理论对后者的 3 个层次进行了重新诠释。（2）现行超循环经济的一个突出特点是在循环经济 3R 原则基础上增加了“再创新”原则，但并未提出具体的创新内涵和途径。其实，任何一种创新都在现有创新基础上的“再创新”。这就是说，“再创新”原则过于空泛，不如减量化、再循环、再利用 3R 原则那么具体、实在和可操作。可见，“再创新”与原有 3R 原则并不对等，还够不上超循环经济的一个新原则。（3）现行超循环经济和循环经济一样，都没有超越资源利用的范畴，没有涉及资源的人工培育和生态的人工恢复，只能实现生态弱害和产业偏利共生，而面向生态文明的超循环经济的真正目标则是实现产业与生态的互利共生，从而实现“人工超生物文明”[1]。（4）现行超循环经济研究只是抽象地描绘了一个“乌托邦式的画面”：提出了概念构想、方针原则[10]、应用对策[11]等，尚未找到并研究具体的实现途径、应用范例、“落地”的超循环经济系统及其运行机理。

鉴于以上分析，本文拟从以下几个方面对超循环经济展开研究。（1）向上突破“天花板”。超越生态弱害和产业偏利共生的发展目标，寻求实现产业与生态互利共生的途径，使经济发展模式产生质的飞跃。（2）向下突破“楼板”。为使超循环经济落地生根，寻求具体的实际应用领域，构建超循环经济的实际应用系统，以解决产业与生态共生发展的现实难题。（3）内涵的明晰。在 3R 原则的基础上，寻求能够代表超循环经济本质属性的具体化的新原则，替代空泛的“再创新”原则。（4）外延的拓展。为实现产业与生态的互利共生，在循环的广度上，要超越资源利用循环，向上游的可再生资源培育拓展；在循环的深度上，不仅研究资源链超循环，还要研究生态链和价值链超循环，以及“三链”协同运作的超循环自组织机理。

2　循环经济的演进过程与结构分析

在对人类环境保护意识的崛起和环保措施的强化过程进行系统梳理和分析后可知，从开环经济到闭环经济模式的演进过程经历了先污染、后治理、再循环几个发展阶段。下面对其系统结构和本质特征逐一进行分析，从中发现其演进规律，为超循环经济的研究奠定基础。

2.1　“从摇篮到产品”的粗放经济

最初的经济增长方式只关注生产活动，以经济增值为唯一目标，而忽视对人类赖以生存和发展的自然环境的保护，我们称之为粗放经济模式。它与通常所说的“粗放型经济”不同，后者是指在经济系统内部的粗放经营，与集约型经济相对应。而本文所说的“粗放经济”并不局限于经济系统内部，还包括了它与会环境和自然环境相互作用时的粗放。具体来说，在粗放经济模式下，工业企业大量消耗自然资源进行产品的生产，人类社会毫无节制地使用产品，而对产品生产过程中所产生的污染物和产品使用后的废弃物则直接排放和丢弃。如此，不仅导致经济系统投入产出效率低下，而且导致自然资源的滥用和自然环境的严重污染。也就是说，人

们只注重从“摇篮”(资源耗用)到产品生产和使用的过程,而不关心生态环境的恶化。因此,称之为“从摇篮到产品”的开环的粗放经济模式,其概念结构如图 1 所示。

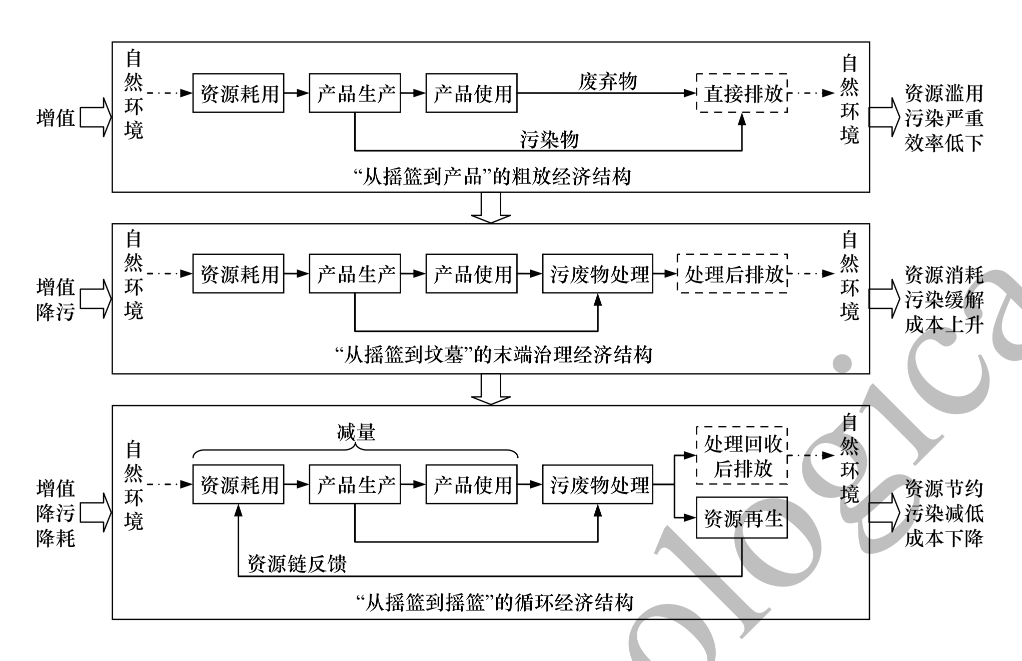


图 1 经济模式的演进与循环经济的形成

Fig.1 Economic patterns′ evolution and circular economy′s formation

2.2 “从摇篮到坟墓”的末端治理经济

20 世纪 50 年代之后,西方主要国家看到粗放经济所造成的严重的环境污染后果,开始重视资源链的末端治理,树立起经济增值和降低工业生产对环境污染的双重发展目标。在公众觉醒和社会压力下,企业的关注范围沿着从“摇篮”到“产品”,向下游延伸至产品的“坟墓”。即对生产过程中产生的污染物和产品使用后的废弃物进行末端处理,去除其中的有害物质,降低环境污染,从而形成对资源链全生命周期的关注。因此,我们称之为“从摇篮到坟墓”的开环的末端治理经济模式,其概念结构如图 1 所示。但是,这种经济模式仍然是开环的,其资源消耗量依然很大,而且污染处理所导致的成本增加在一定程度上阻碍了环境治理的进程。

2.3 “从摇篮到摇篮”的循环经济

20 世纪 60 年代之后,为了克服末端治理经济的弊端,循环经济思想诞生了。人们模仿自然生态系统中的物质循环原理,开始意识到“世界上没有绝对的垃圾,只有放错了地方的资源”。循环经济模式需要在末端治理之前,对产品生产和使用中产生的污废物进行分类处理,将其中有用的资源作为同一个生产过程,或同一个企业的其他生产过程,或另一个企业的原料,进行再加工和再利用,形成资源链的闭环系统。同时,在经济系统内部,采取集约型经济和清洁生产等方式,在资源耗用、产品生产和产品使用等过程中尽可能做到资源消耗和污染物发生的减量化。总之,循环经济以经济增值、降低污染排放、降低资源和能源消耗为多重目标,不仅可以进一步降低环境污染,而且可以降低自然资源的消耗速度,同时还能降低生产成本,提高投入产出效率。因此,我们将这种把污废物从“坟墓”里拉回来,重新回归“摇篮”,成为可用资源的经济模式,称为“从摇篮到摇篮”的闭环的循环经济,其概念结构如图 1 所示。

与开环经济相比同,循环经济是一种更好的保护自然环境的“防病”措施,可以防止自然环境不再患上新病,或者不再加重病情。但是,不生病并不等于健康。自然环境的原有病症如何康复?只能靠自然系统的自身修复能力,这是一个漫长,有时是无法实现的过程,而人类对此无所作为。为解决这一问题,提出一种能够促进生态环境健康发展的新型循环经济模式——超循环经济。

3　面向生态文明的超循环经济的理论构想

3.1　超循环经济的本质属性——基于文明演化的共生理论

根据人类文明演化的共生理论[1],人类各文明形态演进过程和产业系统与生态系统的共生关系的变化息息相关(表 1)。表 1 中,共生属性用符号"(产业±, 生态±)"表示产业与生态系统相互作用的受力情况:"+"表示受到促进或获利,"-"表示受到抑制或受害,"0"表示不受对方的影响。在原始文明阶段,人类对自然缺乏认识,以采猎天然生物资源为生,对自然界怀有敬畏之感。其共生属性表现为生态系统受正力,而产业系统刚刚萌芽,受到原始自然条件的制约,受力为 0 和弱负力(故曰本色文明)。在农业文明阶段,人类对自然的认知水平有了一定的提高,通过砍伐森林,开垦黄土地(故曰黄色文明),种养人工生物,获得食物等农产品,并从改造自然中获益。农业在经历了受限和受阻模式后(-, +),逐步发展起来,而生态系统的获利程度也随之逐步下降,直到既不获利也不受害的产业偏害模式(-, 0)。在传统工业文明阶段,科技水平得到较大提高,人类通过大量采掘天然化学资源,制造机器和工业产品,并逐步树立起征服自然的雄心壮志。经过产业与生态系统的竞争模式(-, -),产业逐步强大起来,达到既不获利也不受害的生态偏害模式(0, -),最终进入了产业获利而生态强害的产业寄生和捕食模式(+, -)。这是一种粗放的资源消耗和环境污染加重的工业发展模式(故曰黑色文明)。在新工业文明阶段,人类环境保护和尊重自然的意识开始觉醒,通过制造高科技材料等人工化学资源、利用太阳能和风能等天然物理资源、开发信息系统等人工物理资源,并通过末端治理和初步循环经济等集约化方式逐步减少天然资源和能源消耗,降低环境污染(故曰青色文明),达到生态弱害模式。在生态文明阶段,人类意识到人是自然界的组成部分,发现长期被忽视的"天人合一"等古代哲学思想的现实价值,认识到产业与生态应当并能够实现互利共生。首先,通过实行循环经济等方式使产业发展对生态的不良影响下降到 0,实现产业偏利共生模式(+, 0),防止生态系统进一步"患病",依靠其天然生物机能缓解病情,迈入生态文明的门槛(故曰浅绿文明)。然而,仅仅"不生病"是不够的,需要通过人工种植和养殖生物、实行超循环经济等方式更加积极有效地增进生态系统的健康发展,实现产业与生态的互利共生的模式(+, +),深化生态文明(故曰深绿文明)。此时,文明的科学属性经历了生物文明、化学文明和物理文明的螺旋式上升后,回归并提升至生物文明的高级阶段——超生物文明(包括天然和人工超生物文明),产生了质的飞跃[12]。

表 1　人类文明演进的属性谱系

Table 1　Attributes spectrum of human civilization evolution

文明阶段 Civilization	认识属性 Cognition	共生属性(产业±,生态±) Symbiosis(Industry±, Ecology±)	科学属性 Science	产业属性 Industry	颜色属性 Color
原始文明 Original	敬畏自然	生态偏利共生(0, +); 生态强利(-, +)	天然生物文明	采猎文明	本色文明
农业文明 Agricultural	改造自然	产业受限和受阻(-, +); 产业偏害(-, 0)	人工生物文明	农耕文明	黄色文明
传统工业文明 Traditional industrial	征服自然	竞争(-, -); 生态偏害(0, -); 产业寄生/捕食(+, -)	天然化学文明	粗放工业文明	黑色文明
新工业文明 New Industrial	尊重自然	生态弱害(+, -)	人工化学文明 天然物理文明 人工物理文明	集约工业文明(末端治理经济→初步循环经济)	青色文明
生态文明 Ecological	"天人合一"	产业偏利共生(+, 0)	天然超生物文明	防病式后工业文明(循环经济)	浅绿文明
		互利共生(+, +)	人工超生物文明	健康式后工业文明(超循环经济)	深绿文明

将上述循环经济的产生过程与人类文明的演进过程进行对比,可以看出,图 1 所示的粗放经济是一种生态强害的非共生发展方式,与传统工业文明相对应;末端治理经济是一种生态弱害的集约型非共生发展方式,

与新工业文明的初期相对应。循环经济模式进一步弱化了产业对生态的危害,逐步逼近和达到产业偏利共生模式,分别与新工业文明后期和浅绿文明相对应。从以上分析可见,“后循环经济”应当是与深绿文明相对应的,能够实现产业与生态互利共生的经济发展模式,这就是超循环经济的本质属性。

3.2 超循环经济的多层结构——基于超循环理论

确定了超循环经济的本质属性后,就需要研究超循环的基本构成及其自组织原理。对此,超循环理论提供了有力的理论支撑。超循环理论(hypercycle theory)是德国科学家艾根(Manfred Eigen)在 20 世纪 70 年代提出的建立在分子生物学基础上的关于非平衡态系统的自组织理论。该理论提出了自然界演化的自组织原理——超循环,揭示了从化学系统到生物系统的进化机制,在分子生物学水平上,建立了一个通过自我复制和自然选择而进化到高度有序水平的自组织系统模型。虽然该理论着眼于微观世界的自组织现象,但宏观系统也有相似的演化规律和自组织方式。因此,近年来超循环理论已广泛应用于生态文明建设[13]、低碳与循环经济[11]、企业与区域经济管理[14]、信息资源管理[15]等方面。借鉴这些成果,可以将超循环理论应用于超循环经济的研究。

将超循环理论与循环经济系统进行对比,可以发现超循环经济(hypercycle economy,HCE)的基本构成与自组织原理(表 2)。(1)关于“循环”。在超循环理论中,“循环”又称基层循环或反应循环,是指靠外部催化剂驱动的具有自复制特性的反应序列,其中任何一步反应的产物可作为另外某一步的反应物。在超循环经济中,“循环”对应于将企业中的一个生产过程的废弃物或多余能量作为另一个生产过程的原料或能源而形成的资源链的闭合结构,从而形成自复制机制。(2)关于“超循环”。在超循环理论中,“超循环”又称一重超循环或催化循环,是指由若干个基层循环在功能上耦合起来而构成的高层循环,进而形成具有自催化和自复制特性的二级循环网络。在超循环经济中,“超循环”对应于企业中的多个资源链基层循环进一步耦合,形成整体企业的高层资源链循环网络,它具有自催化和自复制特性。(3)关于“多重超循环”。在超循环理论中,“多重超循环”是指由若干个超循环进行更高层次的有机组合,形成多重嵌套的复杂超循环系统。各循环单元既能自催化和自复制,又能催化下一单元。在超循环经济中,“多重超循环”包含了三次超循环拓展。首先由供应链网络中的多个企业的资源链(一重)超循环耦合成二重超循环系统——资源链拓展层超循环网络;然后再拓展到自然环境系统中形成三重超循环系统——嵌套了资源链超循环的生态链拓展层超循环网络;最后进一步拓展到社会经济系统中形成四重超循环系统——嵌套了资源链和生态链超循环的价值链拓展层超循环网络。“三链”超循环既能自催化和自复制,又相互催化。(4)关于超循环的自组织过程。超循环理论认为,基层循环靠外部催化剂驱动,(一重)超循环兼具自催化和自复制特性,(多重)超循环的各单元既能自催化和自复制,又能催化下一单元。各循环单元自行循环、相互作用、相互催化,形成自组织机制,使系统向更高的有序状态进化。在超循环经济中,资源链、生态链和价值链自行循环、相互作用、相互催化,进而促进该超循环经济系统良性循环和共生发展,使系统向更高的绿色文明状态演进。

表 2 超循环理论在超循环经济中的应用

Table 2 Application of hypercycle theory to hypercycle economy

层次与过程 Layer and process	超循环理论 Hypercycle theory	超循环经济 Hypercycle economy
循环 Cycle (反应循环 Reactive cycle)	靠外部催化剂驱动的具有自复制特性的反应序列,一步的产物是另一步的反应物	一个生产过程的废弃物作为另一过程原料的资源链闭合结构,具有自复制特性
超循环 Hypercycle (催化循环 Catalytic cycle)	由若干基层循环耦合而成的具有自催化和自复制特性的高层循环网络	企业中由多个资源链循环耦合而成的高层资源链循环网络,具有自催化和自复制特性
多重超循环 Multi-layer Hypercycle	由若干个超循环耦合而成的更高层多重超循环,各单元自催化和自复制,又催化下一单元	在企业与环境多层次上拓展资源链、生态链和价值链,形成多重嵌套的超循环网络,各层超循环既自催化和自复制,又相互催化
自组织过程 Self-organizing process	各单元自行循环、相互催化,形成自组织机制,使系统向更高有序状态进化	资源链、生态链和价值链自行循环、相互催化,使超循环经济良性循环,向深绿文明演进

3.3 超循环经济的概念结构——“从孕育到孕育”

根据以上分析,在“从摇篮到摇篮”循环经济的资源链反馈结构基础上(图 1c),可构筑图 2 所示的超循环经济概念结构。该系统把可再生资源的培育纳入循环体系,而这一环节兼具产业和生态的双重特征,是两系统互利共生的关键环节。以林纸拓展系统为例,林木资源的培育不仅为造纸工业提供必要的原料来源,同时还发挥着改善生态环境、固碳制氧、水土保持、维护生物多样性等生态功能,而造纸工业的发展又会通过价值链反哺资源培育,进而形成产业与生态相互促进的良性循环。芬兰的林业发展历程就很好地验证了这种互利共生的现实可行性。芬兰的森林曾经遭受过战争和其他人为与自然因素的严重破坏。二战后,该国通过先进的管理方法和绿色造纸技术,构筑了造纸工业和营林业的良性互动机制,实现了两者的双赢。目前芬兰的森林覆盖率已高达 76%,生态效益良好[16]。

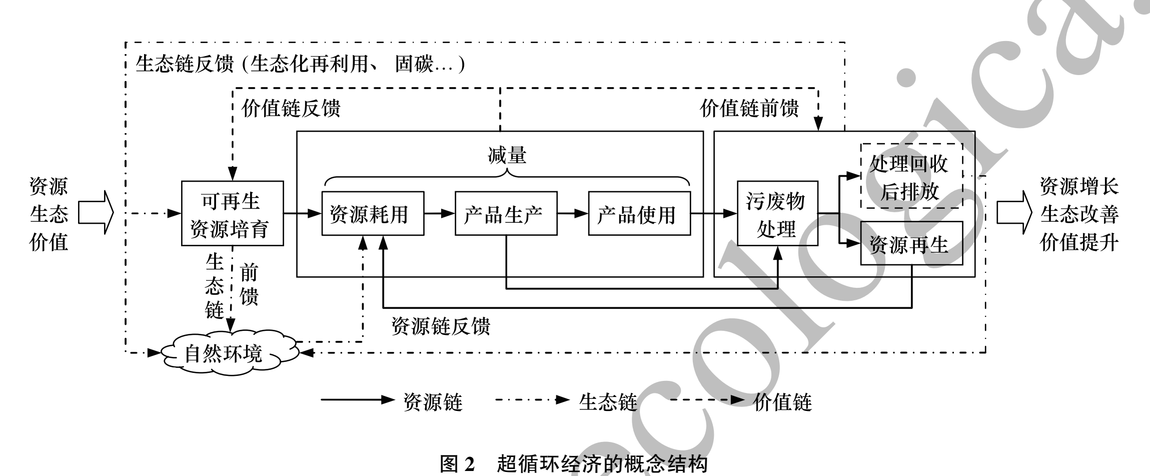


图 2 超循环经济的概念结构

Fig.2 Conceptual structure of hypercycle economy

由图 2 可见,超循环经济系统包含资源链、生态链和价值链的多重超循环结构。从“婴儿”在“摇篮”期之前的“孕育”过程出发,不仅通过资源链反馈至“摇篮”,而且通过价值链和生态链回馈“孕育”过程。从自然环境所受到影响来看,生态链的前馈和反馈对环境产生正向作用。虽然污废物的排放和自然资源耗用对环境有负向作用,但一方面由于可再生资源的培育和资源的减量化使用,使得自然资源耗用显著下降,另一方面污废物的资源化利用和处理使得最终排放到自然环境中的污染物大大降低。因此在超循环经济模式下,自然环境受到的正向作用远大于负向作用,从而促进了自然环境的生态改善,使之从“防病”演进到健康状态。而在图 1c 所示的循环经济模式中,自然环境没有受到正向作用,人们所能做的只是尽可能减小负向作用。可见,超循环经济是一种“从孕育到孕育”的健康式经济发展模式,它以资源、生态和价值的协同提升为目标,最终实现资源增长、生态改善和价值提升。

4 超循环经济的实证研究——以林纸拓展系统为例

为验证图 2 所示系统的可实现性,下面需要通过实证研究将超循环经济系统具体化。由于超循环经济涉及面很广,泛泛地研究难以得出更有价值的结果,需要选择一个具体的应用领域进行深入探讨。森林是陆地生态系统的主体,具有固碳制氧、保持水土、涵养水源、防治土地沙漠化、维护生物多样性等关键的生态功能,并对其他陆地生态系统的变化产生重要影响。在与森林相关的工业中,造纸工业无论在社会经济和生态环境方面都具有十分突出的地位。而且林纸一体化、绿色造纸、造纸循环经济也是国际造纸工业的发展趋势[17]。因此,选择林纸拓展系统 EFPS 作为超循环经济实证研究的对象。

进入 21 世纪后一些专家提出了我国造纸工业发展循环经济的构想,研究了造纸业实施循环经济的必要性、适应性和基础条件等,认为现代造纸工业是发展循环经济的理想载体[18]。在工程技术层面,许多学者分别对木材原料的有效利用、废纸回用、废水循环和再利用[19]、造纸污泥的资源化利用[20]、能量回用、热电联

产[21]、清洁生产、污染控制等单项循环技术进行了比较微观的研究。在经济管理层面,一些学者对造纸工业循环经济的效率[22]、生态工业园[23]、产业集群[24]等进行了比较宏观的研究。在这些研究的基础上,超循环经济的研究需要完成以下工作:单项循环经济技术的集成、循环经济工程技术与经济管理的整合、原料林培育与制浆造纸的集成、造纸业与木材加工业的集成、产业与生态系统的集成等,然后构建能够协调产业与生态系统共生关系的 EFPS 超循环经济系统模型。

4.1 EFPS 超循环经济的多重拓展-嵌套建模路径

根据表 2 所示的超循环层次结构,以及林纸拓展系统的特点[25],可得出图 3 所示的 EFPS 超循环经济系统建模的多重拓展-嵌套逻辑路径。首先需要构建制浆造纸系统的核心层资源链结构,然后依此进行微观资源链拓展、中观生态链拓展和宏观价值链拓展,进而逐层构建整体的 EFPS 超循环经济系统。其中,资源链核心层和资源链拓展层合起来属于产业系统,它由以制浆造纸业为核心的供应链系统构成。其纵向供应链包括森林培育业、制浆造纸业和市场营销业等,横向供应链包括木材加工业、家具制造业和林产化工业等。在产业系统中,森林培育业是联系人工系统和自然系统的桥梁,是产业和生态系统共生关系的纽带。由图 3 可见,制浆造纸、供应链、生态环境、社会经济等系统并不是并列的关系,而是层层拓展、层层嵌套和相互交织的关系。也就是说,在制浆造纸和供应链系统中,关注资源链循环;在生态环境系统中,同时包含了资源链和生态链,关注生态链循环及其对资源链的作用;而在社会经济系统中,资源、生态和价值链均有涉及,关注价值链循环及其对资源链和生态链的作用。

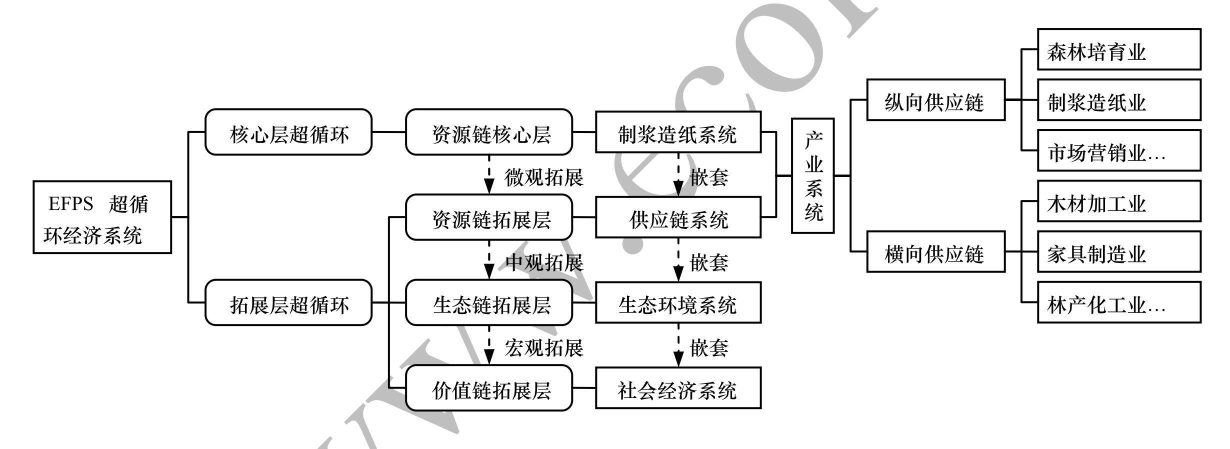


图 3 EFPS 超循环经济的多重拓展-嵌套建模路径

Fig.3 Multi-layer expansion-nestification modeling route of EFPS hypercycle economy

4.2 EFPS 超循环经济多重拓展-嵌套模型的构建

根据图 3 的逻辑路径,经过资源链、生态链和价值链的逐层拓展,可以构建一个庞大的 EFPS 超循环经济系统模型。为了便于表达和应用,采用多重拓展-嵌套的方式来描述这一复杂系统的整体结构。

首先,在制浆造纸系统中研究资源链核心层超循环系统。以我国制浆造纸企业常用的碱法制浆工艺为例,对各种单项的制浆造纸工艺中的资源循环利用技术进行梳理、筛选和整合[26],可以构建 EFPS 超循环经济系统的资源链核心层的详细结构模型。为了更清晰和简捷地表达和突出核心层的主要超循环机理,对该详细结构模型进行抽象和提炼,得到图 4 所示的资源链核心层结构模型。其中的方框表示资源处理过程(简称资源过程),有向实线表示资源流(包含物质流和能量流)。顺箭头方向的资源流把资源过程连接起来所形成的链条就是资源链。图 4 不仅描述了制浆造纸生产中的“备料→制浆→抄纸”主干过程,而且给出了碱回收、水处理、热电联产、烟尘和废渣处理等辅助过程,进而构成了由废纸回收、碱回收、水回收、纤维回收、石灰回收、废料回收、蒸汽回收和电力回收等多重循环构成的资源链超循环系统。

其次,将资源链核心层超循环系统在供应链系统的纵向和横向两个维度进行微观拓展,形成资源链拓展层超循环系统。具体来说,将图 4 中的木材原料输入等向供应链上游拓展到森林培育环节;将纸产品输出和

废纸原料输入等向供应链下游拓展到绿色营销和绿色消费环节；将废纸、废木和木材加工剩余物输入等在横向拓展到木材加工环节；将处理后的排放物（污泥、煤灰和木质素等）在横向拓展到废物加工环节[27]。为解决资源链拓展层超循环系统结构过于庞大和难以表达的问题，对资源链拓展层超循环系统的详细结构模型进行抽象和提炼，并将图 4 资源链核心层浓缩和嵌套于“资源链核心层结构”框中，形成图 4 所示的简捷的资源链拓展层结构。这样就可以清晰地看出营林循环，化学和物理加工循环，污泥包装材料、煤灰砖建材和木质素助剂循环等资源链超循环机理。

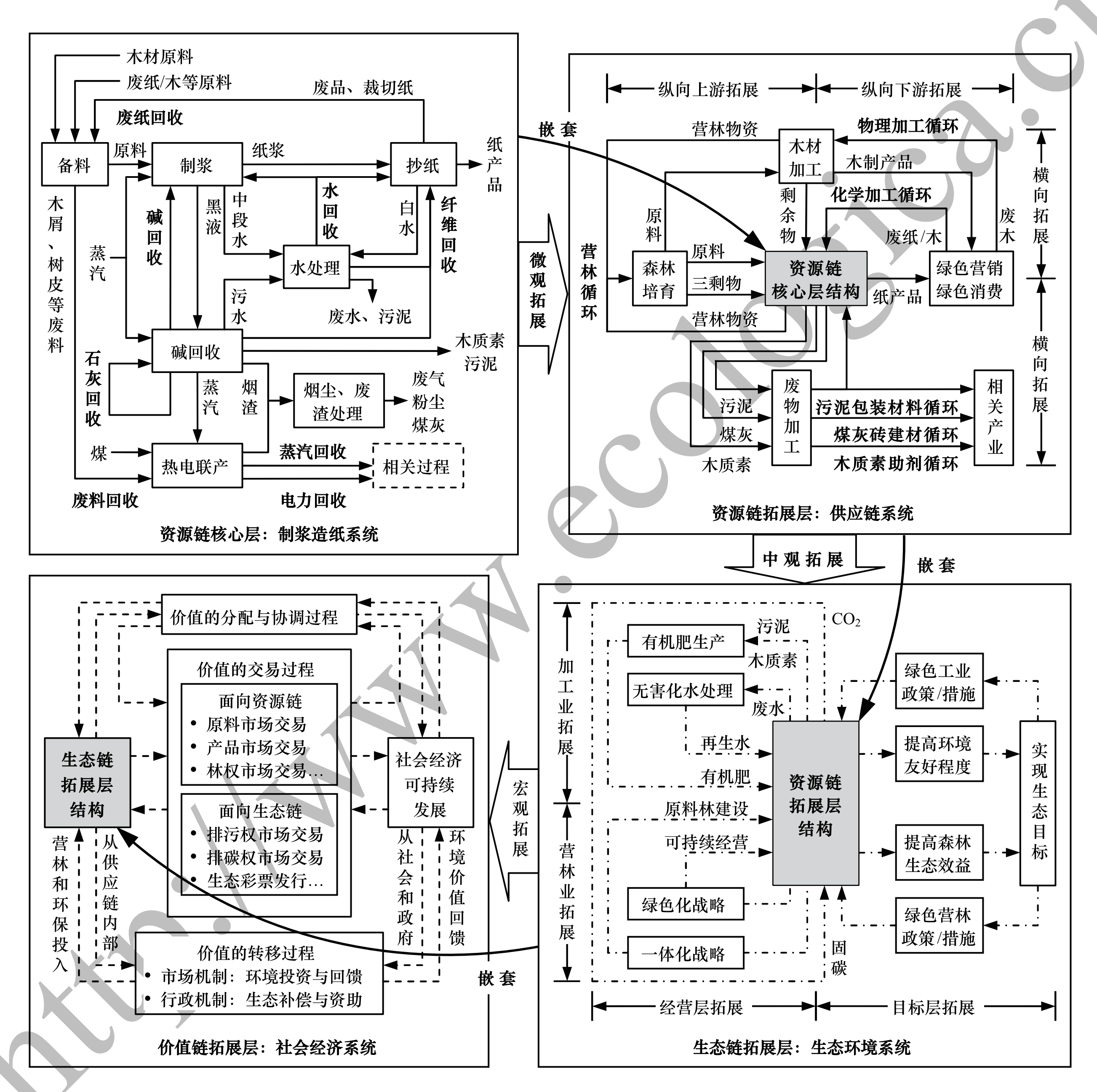


图 4　EFPS 超循环经济的多重拓展-嵌套模型

Fig.4　Multi-layer expansion-nestification model of EFPS hypercycle economy

再次，将资源链拓展层超循环系统在生态环境系统的目标层-经营层和加工业-营林业两个维度进行中观拓展，形成生态链拓展层超循环系统。森林等资源是生态系统的生物学基础，根据生态学原理和我国生态建设的实践，可以将资源链拓展层超循环系统拓展至生态环境系统[27]。同样，将图 4 资源逻拓展层浓缩和嵌套于“资源链拓展层结构”框中，并对详细的生态链拓展结构进行简化，可形成图 4 所示的生态链拓展层结构。

图 4c 中的各方框(灰色框除外)表示促进生态系统良性发展的过程(简称生态过程),有向点划线表示生态流(包含作用于生态系统的物质、能量、资金、技术、信息、政策等)。顺箭头方向的生态流把生态过程连接起来所形成的链条就是生态链。在加工业的生态链拓展部分,绿色工业政策促进了资源节约、节能减排和生态工业园建设等措施的实施,同时图 4 输出的废水、污泥和木质素等经无害化水处理和有机肥生产等过程转变为对林木生长有利的再生水和有机肥等资源,从而提高了工业系统的环境友好程度。在营林业生态链拓展部分,绿色营林政策促进了森林分类经营、森林认证和采伐约束等措施的实施,同时林纸一体化和绿色化等战略促进了原料林建设和林木可持续经营(如实行近自然育林方式等),从而提高了森林生态效益。此外,森林固碳等作用将加工业和营林业两部分联系在一起。在以上生态链超循环的综合作用下,该系统能有效实现改善生态环境的目标。

最后,生态链拓展层超循环系统在社会经济系统中进行宏观拓展,形成价值链拓展层超循环系统。资源链和生态链超循环的驱动力在于价值链超循环。我国林纸循环经济发展中的瓶颈和国外林纸互动的成功经验都表明价值链的催化剂作用在超循环经济运行中起到至关重要的作用。我们将迈克尔·波特提出的价值链理论运用于 EFPS 超循环经济,对价值链循环过程进行梳理和优化[27],凝练出价值的分配与协调、价值的交易(包括面向资源链和生态链的市场交易)和价值的转移(包括市场和行政机制)三类基本过程。经过系统简化,并把图 4 生态链拓展层浓缩和嵌套于"生态链拓展层结构"框中,构建了如图 4 所示的价值链拓展层结构模型。图中,各方框(灰色框除外)表示促进价值增值的过程(简称价值过程),有向虚线表示价值流(不是狭隘的资金流,而是绿色发展观指导下的综合效用流)。顺箭头方向的价值流把价值过程连接起来所形成的链条就是价值链。良好的价值链超循环可以调动制浆造纸企业、木材加工企业、营林企业、林农、政府部门和社会组织等各类主体的积极性,促进资源链和生态链的良性循环,而资源链和生态链的健康发展反过来又会支撑价值链的持续增长,最终推进整个超循环经济系统朝着有序的方向不断演进。

综合以上 4 个部分,就得到了图 4 所示的多重拓展-嵌套模型。该模型既能体现 EFPS 超循环经济系统的整体结构,又能反映其层次结构。首先,整体结构便于对该复杂系统有一个完整和全面的认识,便于在实际工作中开阔视野和拓展思路,有利于各级政府在制定国家和区域的循环经济发展战略。其次,分层结构有利于各决策主体(如造纸和木材加工企业、营林组织、供应链、相关行业协会等)在制定不同层面循环经济决策时,根据各自独特的需求和关注点各取所需。再次,拓展-嵌套模型便于理解局部超循环与整体超循环的关系,有利于协调各利益相关者之间关系。

5 基于实证的理论提升

5.1 超循环经济的 5R 原则与 5R-3C 理论模型

从以上实证研究可知,超循环经济系统不仅要遵循一般循环经济的 3R 原则,还要遵循促进产业与生态互利共生的原则。对图 4 所示的 EFPS 超循环经济系统的多重拓展-嵌套模型进行理论提升,我们提出超循环经济的 5R 原则:在原有的减量化(reduction)、再循环(recycle)、再利用(reuse)的 3R 原则的基础上,增加再分配(redistribution)和再培育(recultivation)原则。为实现 5R 原则的功能,构建与此相应的 5R 子系统,然后根据图 2 和图 4 的原理,通过资源链、生态链和价值链(3C)可将 5R 子系统联系成超循环经济的 5R-3C 理论模型(图 5)。由 5R-3C 模型可见,为实现面向生态文明的超循环经济,需要在建设一般循环经济的基础上,应着力构筑再分配和再培育两个子系统,并完善资源链、生态链和价值链相互促进机制。

5.2 超循环经济的 5R-3C 共生运行机理

在 5R-3C 理论模型中,资源链、生态链和价值链 3C 超循环并不是独立运行的,它们通过 5R 子系统相互耦合、相互催化,进而形成超循环经济系统的 5R-3C 共生运行机制。其中,价值链是动力和纽带,它通过利益机制促进资源链和生态链的良性发展;资源链是基础,它是生态链的生物学基础,又是价值链的物质基础;生态链是支撑,它既是资源链持续增长的生态学支撑,又为价值链的运行提供良好的生态环境支撑。同时,3C

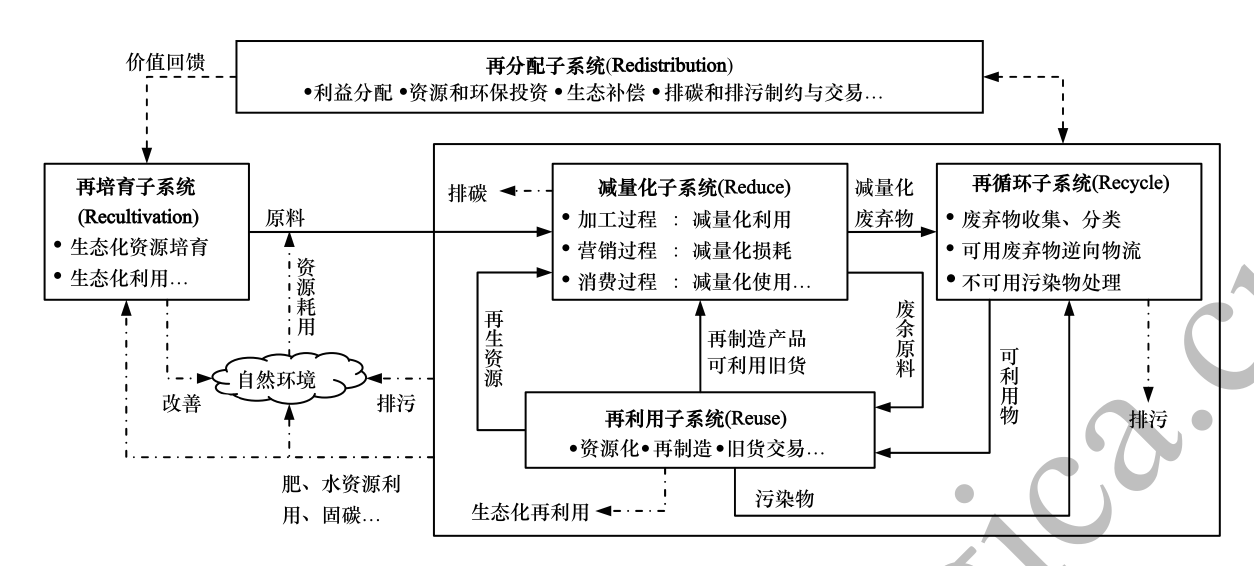


图 5　超循环经济的 5R-3C 理论模型

Fig.5　5R-3C theoretical model of hypercycle economy

循环链将 5R 子系统联系成一个超循环有机系统，使各子系统有效发挥各自的功能。其中，再分配子系统是整个超循环系统良性运行的核心环节。它通过合理的利益分配和市场交易、反哺资源培育的价值回馈、可再生资源培育的多元化投资、生态效益正外部性的内部化补偿等措施为再培育子系统的良性发展注入活力。同时，环保投资、负外部性的内部化成本支出、碳排放和污染排放权的市场交易等措施将促进减量化、再循环和再利用子系统的健康发展，并与再培育子系统一起形成资源链和生态链的良性循环。

此外，在超循环经济系统的运行过程中，需要将组织过程（政府行政行为和非政府组织行为）与自组织过程（市场机制）进行有机结合。其中，构建、营造和发挥好市场机制是实现系统自组织性的关键，而政府的行政行为只限于进行符合客观规律的宏观调控，不能进行微观介入，不能过度干预甚至破坏系统的自组织机制，否则将违背超循环理论的科学原理。

6　结论

6.1　各经济模式的综合比较

综合以上研究结果，可以从多个维度列出粗放经济、末端治理经济、循环经济和超循环经济的主要特性对比（表 3）。由表 3 可以提炼出超循环经济的本质特征，由此可以给它下一个比较科学的内涵界定：超循环经济是一种面向生态文明的闭环经济发展模式，它以可再生资源培育作为出发点和归宿点，形成“从孕育到孕育”的包含资源链、生态链、价值链多重超循环的自组织系统，通过减量化、再循环、再利用、再分配、再培育 5R 原则，实现资源增长、生态改善和价值提升的产业与生态互利共生的综合目标。

6.2　超循环经济的“超越性”

由以上研究可知，与循环经济相比，超循环经济具有以下 5 个“超越”特性。

（1）循环链起讫点的超越。将循环链的出发点和归宿点从“原料利用”前移到“资源培育”，把可再生资源培育作为资源加工业的“第一车间”，进而超越“从摇篮到摇篮”的循环，拓展到“从孕育到孕育”的更大范围且具资源增殖性的超循环。

（2）循环链类型的超越。不仅超越企业、供应链和产业经济系统，拓展到更广泛的生态环境和社会经济系统；而且超越单一的资源链循环，拓展到资源链、生态链和价值链的超循环，“三链”相互促进、相互催化，形成良性循环。

（3）循环系统自组织性的超越。超越一般循环经济的组织过程，将多个基本循环耦合起来构成超循环，又将多个超循环耦合起来构成更高层次的具有自组织性的超循环，以促使整体系统从无序向有序演进。这是

超循环理论的在自然和人工复合系统中的推广和深化。

表 3 不同经济模式的特性比较

Table 3 Characteristic comparison among various economic patterns

特性 Character	粗放经济 Extensive economy	末端治理经济 End-treatment economy	循环经济 Circular economy	超循环经济 Hypercycle economy
闭环性 Closed-loop	开环	开环	闭环	闭环
起讫点 Terminals	从摇篮到产品	从摇篮到坟墓	从摇篮到摇篮	从孕育到孕育
功能结构 Functional structure	末端污染	末端治理	过程减量+末端治理+资源循环	过程减量+末端治理+资源循环+生态循环+价值循环
链条 Chain	资源链	资源链	资源链循环	资源链、生态链、价值链超循环
目标 Objective	增值	增值、降污	增值、降污、降耗	资源、生态、价值协同提升
原则 Principle	无原则发展	减排放	3R 原则(减量化，再循环，再利用)	5R 原则(3R+再分配，再培育)
结果 Result	资源滥用 污染严重 效率低下	资源消耗 污染缓解 成本上升	资源节约 污染减低 成本下降	资源增长 生态改善 价值提升
共生性 Symbiosis	生态强害(+，-)	生态弱害(+，-)	浅绿共生(+，0)	深绿共生(+，+)
科技 Science and technology	工业生产	污染处理	物质与能量循环	绿色共生与超循环
文明性 Civilization	黑色文明 (传统工业文明)	青色文明 (新工业文明)	浅绿文明 (生态文明入门)	深绿文明 (生态文明)

(4)循环系统共生性的超越。超越生态弱害和产业偏利共生阶段,实现产业与生态的互利共生。

(5)循环系统文明性的超越。实现从“生物文明”到“超生物文明”的螺旋式上升的质的超越,同时实现从“天然超生物文明(浅绿文明)”到“人工超生物文明(深绿文明)”的超越[12]。

6.3 超循环经济的应用前景

在生态文明建设的背景下,超循环经济理论必将具有广泛的应用前景。本文以林纸拓展系统为例给出了超循环经济的应用实例,为超循环经济的 5R-3C 理论模型及其共生运行机理走向实际应用奠定了良好的基础。由于森林资源是与其他可再生资源(如生物资源、水资源、土地资源、气候资源等)交集最大的自然资源生态系统,因此本文的研究成果可以推广到各类可再生资源的绿色发展领域。例如,在沙漠治理中,可以种植具有经济价值的沙漠植物(如寄生于固沙植物梭梭的中药材肉苁蓉等),将资源链、生态链和价值链耦合起来形成超循环结构,调动各相关主体治沙的积极性,形成良性循环。

参考文献(References):

[1] 张智光. 人类文明与生态安全：共生空间的演化理论. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(7): 1-8.

[2] Boulding K E. The economics of the coming spaceship earth // Jarrett H, ed. Environmental Quality in a Growing Economy. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 1966: 3-14.

[3] Lieder M, Rashid A. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. Journal of Cleaner Production, 2016, 115: 36-51.

[4] Bilitewski B. The circular economy and its risks. Waste Management, 2012, 32(1): 1-2.

[5] Ghisellini P, Cialani C, Ulgiati S. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, 2016, 114: 11-32.

[6] 陈文婷, 廖聪. 循环经济发展的回顾与思考. 广州环境科学, 2015, 30(1): 4-7.

[7] 许云程, 李莉. 循环经济的探索与实践研究. 现代商业, 2012(29): 116-118.

[8] 陈杰, 周露. 超循环经济的理论建构. 经济问题探索, 2006(1): 91-94.

[9] 伍国勇, 段豫川. 论超循环经济——兼论生态经济、循环经济、低碳经济、绿色经济的异同. 农业现代化研究, 2014, 35(1): 5-10.

[10] 昌灏. 论循环经济的超循环系统发展模式. 工业技术经济, 2010, 29(5): 14-16.

[11] 张文洲. 基于超循环经济的我国农业生态化发展研究. 湖北社会科学, 2015(11): 97-101.

[12] 张智光. 从产业与生态的共生关系审视生态文明. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(7): 108-114.

[13] 黄志斌, 邱国侠. 超循环: 生态文明建设的本然依据、应然规范和实然途径. 哲学动态, 2014(1): 100-104.

[14] 张青. 基于自组织超循环的资源型企业群落与区域经济之间互动发展机理研究. 管理学报, 2013, 10(2): 280-287.

[15] Silvestre D A M M, Fontanari J F. The information capacity of hypercycles. Journal of Theoretical Biology, 2008, 254(4): 804-806.

[16] 张智光. 也谈生态文明建设的认识误区. 光明日报(科技周刊·生态版), 2015-08-28.

[17] Rafione T, Marinova M, Montastruc L, Paris J. The green integrated forest biorefinery: An innovative concept for the pulp and paper mills. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 74-81.

[18] 邹细霞, 陈海旭, 樊云龙. 国内循环经济载体研究综述. 再生资源与循环经济, 2015, 8(12): 6-11.

[19] Karthik M, Dhodapkar R, Manekar P, Aswale P, Nandy T. Closing water loop in a paper mill section for water conservation and reuse. Desalination, 2011, 281: 172-178.

[20] Frías M, Rodríguez O, de Rojas M I S. Paper sludge, an environmentally sound alternative source of MK-based cementitious materials A review. Construction and Building Materials, 2015, 74: 37-48.

[21] 昝建民, 尹勇军. 造纸企业热电联产系统并网经济运行实例分析. 造纸科学与技术, 2015, 34(6): 98-101, 110-110.

[22] 陈翔, 肖序. 中国工业产业循环经济效率区域差异动态演化研究与影响因素分析——来自造纸及纸制品业的实证研究. 中国软科学, 2015(1): 160-171.

[23] 王海刚, 程旭, 陈钢. 基于循环经济的我国造纸生态工业园建设探析. 中华纸业, 2012, 33(17): 58-62.

[24] 潘权骁, 俞江磊, 黄承明. 循环经济理论视角下造纸业集群的实证研究——以富阳市春江街道"中国白纸板基地"为个案. 中国造纸学报, 2012, 27(1): 58-62.

[25] 张智光. 绿色中国(第二卷): 绿色共生型供应链模式. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.

[26] 张智光. 绿色供应链视角下的林纸一体化共生机制. 林业科学, 2011, 47(2): 111-117.

[27] 张智光. 林纸循环经济系统的资源、生态和价值链拓展模型. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(12): 46-53.